

超臨界圧貫流ボイラにおける蒸気温度制御の改善

黒石 卓司*, 藤川 卓爾**

Improvement of Steam Temperature Control in Supercritical Once Thru Boilers

KUROISHI Takashi, FUJIKAWA Takuji

New steam temperature control logic for supercritical once thru boilers was developed from the view point of simplicity similar to that of the conventional sub-critical drum type boilers. Water wall outlet steam temperature can be controlled more easily due to larger specific heat capacity of steam than super heater outlet steam temperature. By dividing temperature control into two parts, one at water wall outlet by fuel flow and the other at SH(super heater) outlet by SH spray flow, boiler steam temperature control was much improved. Temperature control index originally defined here would be an barometer for feasibility of temperature control.

1. 緒 言

国内の火力プラントでは、1950年代後半からドラム型ボイラで空気式制御装置によって運転が行われるようになったのが本格的なボイラ制御の始まりである。その後、ドラム型ボイラの75MW, 156MW, 250MW, 350MWへの出力増大を経て、高度成長期の1968年以降はベースロード運用を目的とした600MWクラスの定圧貫流ボイラが主流になった。1970年代後半には部分負荷の高効率運転が可能な変圧貫流ボイラが、1980年代後半には高効率コンバインドサイクル(GTCC)が登場し、火力プラントにおけるベースロードの主役の座は高効率GTCCと燃料費が安価な石炭焼き変圧貫流ボイラに変わった。これに伴ない従来ベースロード運用を行っていた油・ガス焼き貫流ボイラはピークロード運用に変わり、負荷追従性の向上が求められるようになってきた。

一方、この50年間で制御技術は飛躍的に進歩した。制御装置は空気式から電気式(アナログ式)を経て、1980年代後半にデジタル制御装置が出現して目を見張る進歩を遂げた。今日では、イメージできるアイデアは容易に制御系に反映できるために制御ロジックは複雑化の一途を辿っている。団塊世代がリ

タイヤする時代に入り、技術継承への取り組みも注目される昨今、原点に立ち返った単純化が求められている。

本稿では、これらのニーズに応えるべく、ドラム型ボイラの単純な制御をヒントに考案した貫流ボイラ向け新蒸気温度制御方式の開発の成果と、大幅に制御性を向上させることができた要因分析結果について述べる。

2. 従来の蒸気温度制御の課題

2.1 貫流ボイラの蒸気温度制御

前述のように、貫流ボイラはベースロード用として建設されたもので、その制御系は必ずしも負荷追従性を考慮した設計になっていない。その一つが蒸気温度制御である。ボイラの蒸気温度は給水と燃料の流量のバランスで決まることから、燃料流量で主蒸気温度を制御するように計画されている。

2.2 貫流ボイラの従来の蒸気温度制御

図1に貫流ボイラの従来の蒸気温度制御方式とシステム応答時間を示す。この図では、制御操作量と制御対象の関係を示している。

* 大学院 工学研究科 博士課程

** 工学部 機械工学科 教授

2009年3月30日受付

主な関係は、

- ・燃料は主蒸気温度(T4SO)を制御
- ・過熱器スプレ(3IS)は過熱(低減)器温度差(DSDT)を制御となっている。

図中のシステム応答時間は、東京電力広野3号機の実測データである。

- ・燃料 ⇒ T4SOのシステム応答時間：190秒
- ・3IS ⇒ DSDTのシステム応答時間：7秒

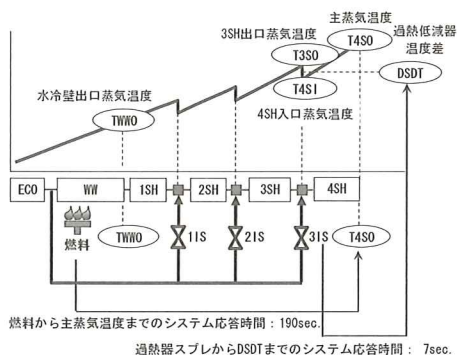


図1 従来の蒸気温度制御方式とシステム応答時間

このような応答時間の場合、制御調整はシステム応答時間が最も長い190秒にあわせてチューニングするので制御感度は低めの値に設定される。このため、整定までの時間を長く要する。また、本プラントでは主蒸気管はA、B、C、Dの4本で構成されているが、その間の温度偏差が大きい。これらの点について改善が求められていた。

従来方式による制御調整結果を図2に示す。蒸気温度の整定時間ならびに制御偏差は

- ・主蒸気温度の整定時間：15分以上
- ・主蒸気温度A、B、C、Dの制御偏差： $+8^{\circ}\text{C}/-10^{\circ}\text{C}$ であった。

3. 課題への取り組み

以上のような蒸気温度制御の課題を解決する目的で新たな蒸気温度制御方式を考案した。この新蒸気温度制御方式のヒントになったものが、単純な制御を行っているドラム型ボイラの蒸気温度制御方式である¹⁾。

また、単純な制御で安定した蒸気温度制御が実現しているドラム型ボイラの静特性を表わすエンタルピー-圧力線図の等温線の密度に着目した。併せて、変圧貫流ボ

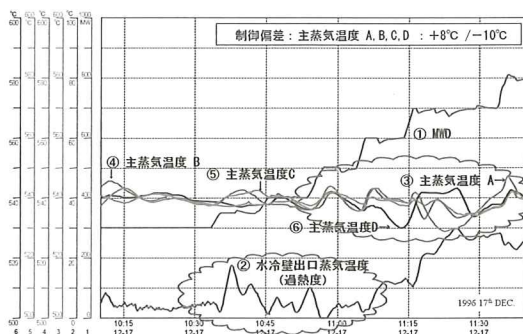


図2 従来方式による制御調整結果

イラ、定圧貫流ボイラ、また、最近部分負荷効率の向上を目的に運用しているSH(過熱器)変圧運転ボイラについて、エンタルピー-圧力線図の等温線の目盛間隔、すなわち、蒸気の定圧比熱について考察した。

さらに、定圧比熱にシステム応答時間を加味した温度制御指数を定義し、蒸気温度制御の容易さを明らかにした。

3.1 ドラム型ボイラの制御方式

図3にドラム型ボイラ制御と貫流ボイラ制御の比較を示す。

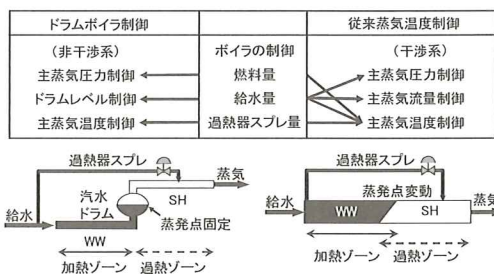


図3 ドラム型ボイラ制御と貫流ボイラ制御の比較

ドラム型ボイラには汽水分離を行う蒸気ドラムがある。このドラム圧力は、主蒸気圧力が制御されることにより一義的に決まり、飽和温度であるドラム温度も同時に決まる。ドラム型ボイラは、蒸発点が固定していること、また、給水によるドラムレベル制御と燃料による主蒸気圧力制御、過熱器スプレによる主蒸気温度制御がそれぞれ独立した制御であり、非干渉系といわれている。一方、貫流ボイラにおける従来の蒸気温度制御は、燃料量によって主蒸気温度を制御している。ただし、給水量の変化も過熱器スプレ量の変化も主蒸気温度に影響を与えるも

のであり干渉系といわれている。そして、この制御方式ではボイラ内の蒸発点が負荷変化に伴ない変動することが特徴の一つである。

3.2 貫流ボイラの新蒸気温度制御

図4に貫流ボイラの新蒸気温度制御と従来の蒸気温度制御の比較を示す。

新蒸気温度制御方式では、燃料はドラム型ボイラと同様にボイラ中間部に相当する水冷壁出口蒸気温度を制御する。水冷壁出口蒸気温度が設定値に制御されることによりボイラ内での蒸発点はほぼ固定されることになる。

すなわち、ドラム型ボイラと同様に蒸発点が固定されることによって、給水による主蒸気圧力制御と過熱器スプレによる主蒸気温度制御はほぼ非干渉系の制御となる。

3.3 定圧比熱

図5にエンタルピー-圧力(h-p)線図²⁾を示す。図中の破線で囲んだエリアは等温線の間隔が粗い部分を示し、実線で囲んだエリアは等温線の間隔が密な部分である。

図6にドラム型ボイラの静特性、図7に変圧貫流ボイラの静特性、図8に定圧貫流ボイラの静特性、図9に定

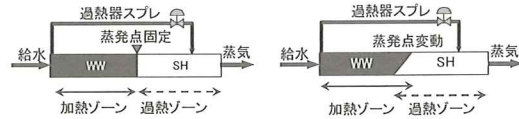


図4 新蒸気温度制御と従来の蒸気温度制御の比較

圧貫流ボイラのSH(過熱器)変圧運転の静特性を示す。

図6のドラム型ボイラにおけるドラム出口温度は、この破線で囲まれた等温線の間隔が粗い部分に含まれており、1°Cの温度変化でエンタルピーが大きく変化する。

一方、図7の変圧貫流ボイラ、図8、図9の定圧貫流ボイラの主蒸気温度部は等温線が密な実線部に位置する。ここでは、1°Cの温度変化に対するエンタルピー変化が小さいので温度制御性が悪くなる。

図7の変圧貫流ボイラのWW(水冷壁)出口部は、破線内の等温線の間隔が粗い部分に含まれる。これは、ドラム型ボイラと同様に1°Cの変化がエンタルピーに大きく影

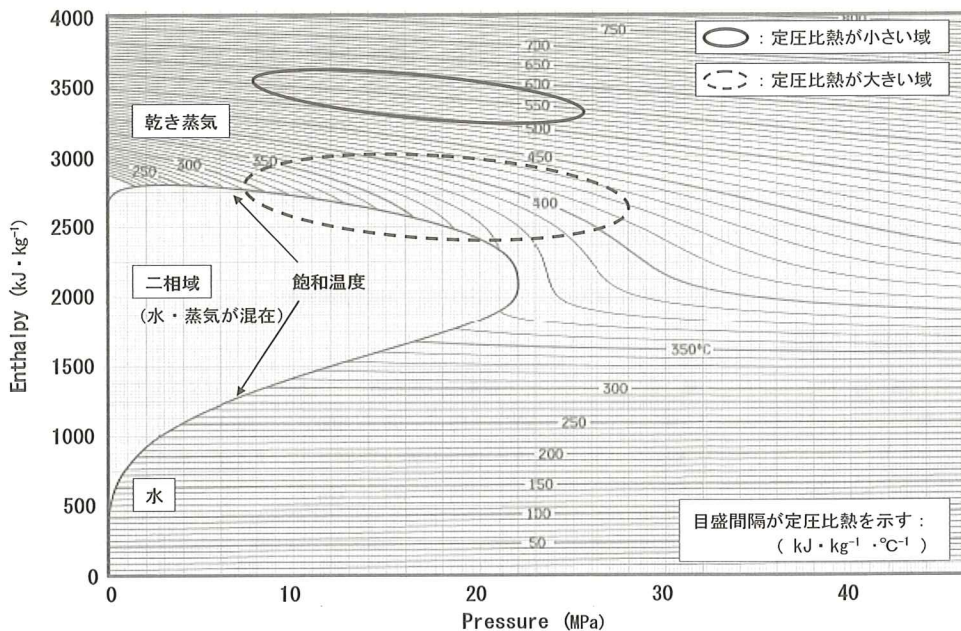


図5 エンタルピー-圧力(h-p)線図²⁾

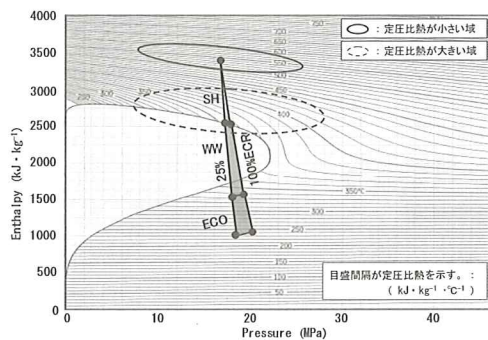


図6 ドラム型ボイラの静特性

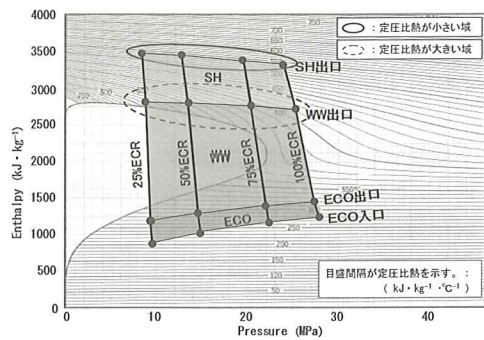


図7 変圧貫流ボイラの静特性

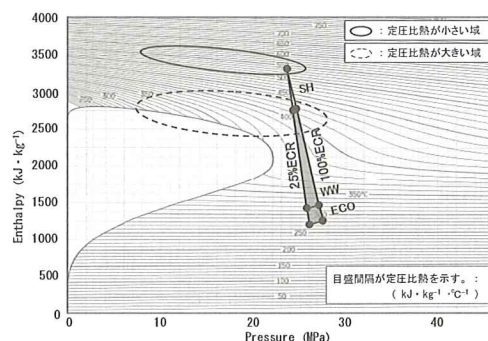


図8 定圧貫流ボイラの静特性

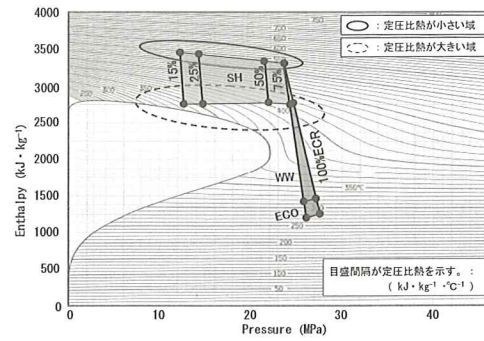


図9 定圧貫流ボイラのSH変圧運転の静特性

響するエリアである。

従って、貫流ボイラにおいても水冷壁出口温度を制御対象として制御することによって、ドラム型ボイラと同様の制御が期待できる。

ここで、この等温線密度の指標となるものが定圧比熱 C_p ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) である。貫流ボイラの水冷壁出口温度

部と主蒸気温度部の蒸気の定圧比熱を比較すると表1のようになる³⁾。

表1は、東京電力広野3号ボイラ(1,000MW、変圧貫流型)における新蒸気温度制御方式の場合と従来制御方式の場合の制御対象部位の定圧比熱を25%、50%、75%、100%負荷について示している。

表1 変圧貫流ボイラの定圧比熱と温度制御指数

[広野3号機 1,000MW]

項目	単位	新蒸気温度制御				従来蒸気温度制御			
負荷	%	25	50	75	100	25	50	75	100
主蒸気圧力	MPa	8.6	13.3	20.2	24.1	8.6	13.3	20.2	24.1
水冷壁出口蒸気温度	°C	320	350	395	420	—	—	—	—
主蒸気温度	°C	—	—	—	—	542	542	542	542
エンタルピー	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2849	2786	2774	2803	3489	3433	3364	3318
定圧比熱 C_p	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	4.47	6.19	7.32	6.82	2.43	2.64	2.97	3.18
システム応答時間	sec	45	40	35	30	200	170	130	100
温度制御指数	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$	0.10	0.15	0.21	0.23	0.012	0.015	0.023	0.032

変圧貫流ボイラでは負荷により圧力が変化するので、圧力をパラメータとして定圧比熱と温度の関係を表したものを図 10 に示す。8.6 MPa, 13.3 MPa, 20.2 MPa, 24.1 MPa はそれぞれ 25%, 50%, 75%, 100% 負荷における主蒸気圧力である。

新蒸気温度制御方式は、WW(水冷壁) 出口の蒸気温度を制御対象にしているため、定圧比熱は 4.47~7.32 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) になる。一方、従来の蒸気温度制御方式では、SH(過熱器) 出口の主蒸気温度を制御対象にしているため、定圧比熱は 2.43~3.18 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) になる。従って、新蒸気温度制御方式では、従来の制御方式と比べて制御対象部位の蒸気の定圧比熱が約 2 倍であることがわかる。すなわち、同一の受熱量変化に対して蒸気温度変化が約 1/2 になるため、温度の制御性が良くなる。

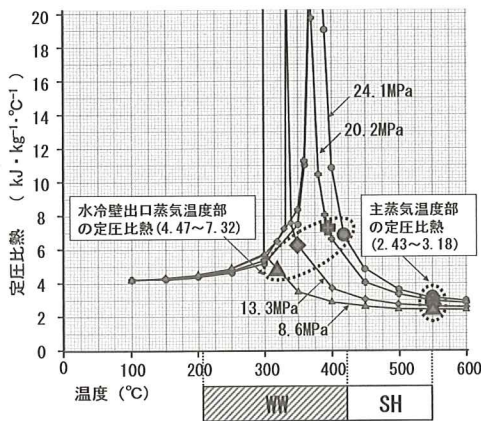


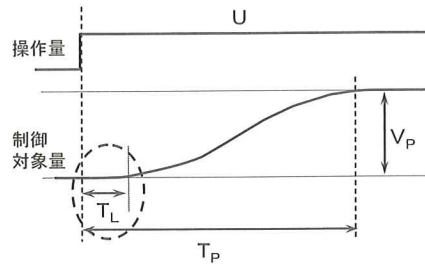
図 10 変圧貫流ボイラの定圧比熱

3.4 システム応答時間

大容量の火力プラントを制御する際に、その制御性を大きく左右する一つの要因がシステム応答時間である。システム応答時間が短ければ、制御感度を高く設定することができる。逆にシステム応答時間が長くなると制御感度は低めに設定する必要がある。

火力プラントの蒸気温度制御は燃料流量と過熱器スプレー量が主な制御操作量になる。

図 11 にシステム応答時間の定義を示す。ここでは、燃料投入量(操作量)変化から蒸気温度(制御対象量)変化までのむだ時間をシステム応答時間 T_L と定義する。



U : 操作量
 T_L : むだ時間
 T_P : ピーク到達時間
 V_P : ピーク変化量

図 11 システム応答時間の定義

3.4.1 システム応答時間の比較

システム応答時間については、1,000MW 変圧貫流ボイラの広野 3 号機に加えて、600MW 定圧貫流ボイラと 250MW ドラム型ボイラの 3 ケースについて比較した。

表 2 にシステム応答時間の比較を示す。

表 2 システム応答時間の比較

項 目	単位 (sec)					
	変圧貫流 1000MW		定圧貫流 600MW		ドラム型 250MW	
負 荷 (%)	50	100	50	100	50	100
水冷壁出口蒸気温度	37	30	35	25	-	-
ドラム出口蒸気温度	-	-	-	-	13	13
主蒸気温度	170	100	68	47	56	40

例えば、1,000MW 変圧貫流ボイラの 50% 負荷において、水冷壁出口蒸気温度のシステム応答時間が 37 秒であるのに対し、主蒸気温度のシステム応答時間は 170 秒で、水冷壁出口蒸気温度部の応答時間が大幅に短いことがわかる。

同様に 600MW 定圧貫流ボイラと 250MW ドラム型ボイラの 50% 負荷におけるシステム応答時間を比較すると類似的の傾向があることが判る。

図 12 に水冷壁出口蒸気温度と主蒸気温度のシステム応答時間を示す。1,000MW, 600MW, 250MW のボイラについて主蒸気温度と水冷壁出口蒸気温度のシステム応答時間を比較すると、大容量である 1,000MW ボイラのシステム応答時間の差が最も顕著であることがわかる。このよ

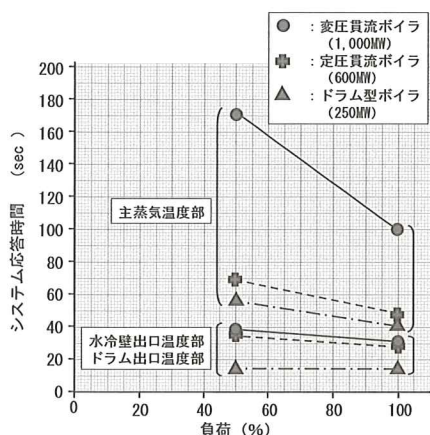


図12 水冷壁出口蒸気温度と主蒸気温度のシステム応答時間

うな結果を制御調整の観点から評価すると、システム応答時間が短い水冷壁出口蒸気温度を制御対象とすることによって制御感度を高く設定できるので制御しやすいといえる。特に、1,000MW ボイラにおける制御感度には大きな差がある。

3.4.2 ボイラサイズによる比較

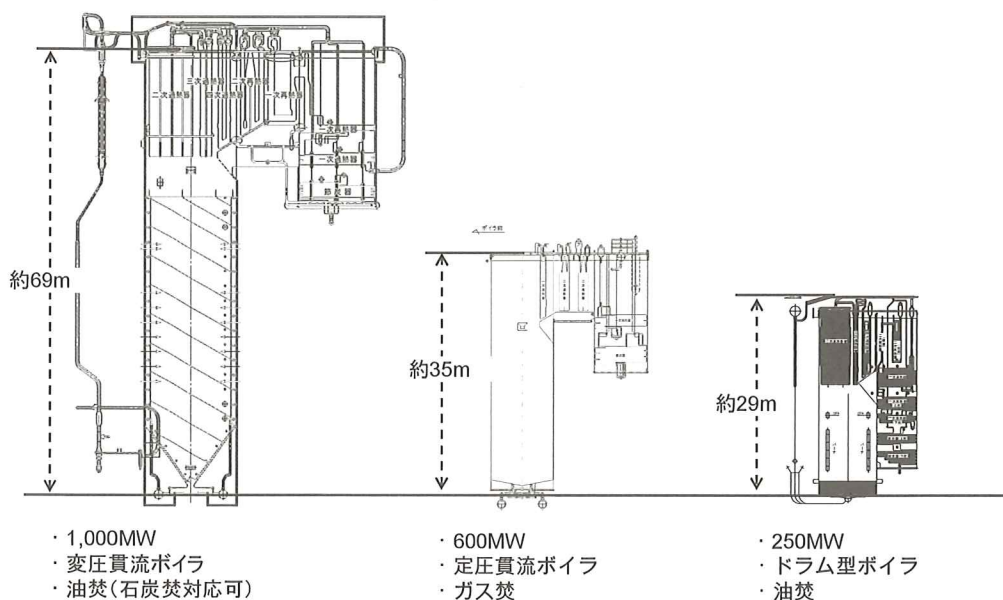


図13 各種ボイラサイズの比較

ここで、システム応答時間に影響を与える要因はボイラの大きさと管路長さである。

ボイラの大きさは、燃焼ガスの滞留時間として制御性に影響を与え、管路長さは内部流体(水または蒸気)の滞留時間として制御性に影響を与える。これらのデータについて整理した。

図13に各種ボイラサイズの比較を示す。広野3号機1,000MWボイラは大容量ボイラである上に、将来石炭焚きが可能となるようにしたものであり、ボイラサイズは国内最大級で、ボイラ高さは約69mである。

比較対象とした600MW定圧貫流ボイラおよび250MWドラム型ボイラは、ガス焚きあるいは油焚きであるためにコンパクトなサイズである。

上記のように、燃料投入量変化から蒸気温度変化までのシステム応答時間に影響を与えるものが燃焼ガスの滞留時間である。この滞留時間は、ボイラサイズおよびガス流速に左右される。石炭焚き対応ボイラはガス焚きと比べて摩擦防止の観点からガス流速が低く設定されていることと熱負荷が小さいためのサイズアップにより、滞留時間が長くなる。これにより、1,000MWの大容量ボイ

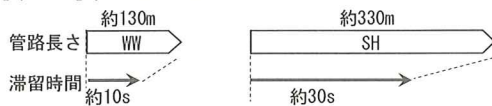
ラのシステム応答時間が、600MW、250MW ボイラに比べ長い値を示していることが裏づけられる。

このように燃焼ガスの滞留時間を考慮した場合には、燃料の制御対象をよりシステム応答時間が短い水冷壁出口蒸気温度部とすることが好ましいといえる。

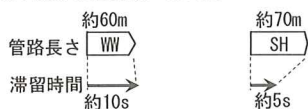
3.4.3 ボイラ管路長さと滞留時間による比較

次に、これらのボイラの管路長さと内部流体(水または蒸気)の滞留時間を比較した。図 14 に管路長さと滞留時間を示す。

【1,000MW】変圧貫流・油焚(石炭焚対応可)



【600MW】定圧貫流・ガス焚



【250MW】ドラム型・油焚

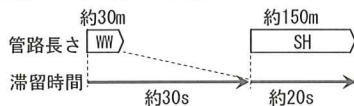


図 14 管路長さと滞留時間

図 14 では、WW 部と SH 部を分けて表現した。管路長さは、内部流体の温度変化特性に影響する。ここでは、過熱器スプレによる主蒸気温度制御性を評価した。

(1) 管路長さ

- ① WW、SH とともにボイラサイズと管路長さはほぼ同様な傾向を示している。
- ② ただし、600MW 定圧貫流ボイラは最も管路長さが短い。

(2) 滞留時間

- ① SH 部の滞留時間はどれも 30 秒以内で過熱器スプレによる主蒸気温度制御を行うために適当な時間といえる。
- ② WW 部の滞留時間は変圧貫流ボイラ、定圧貫流ボイラともに 10 秒程度と短い。
- ③ ドラム型ボイラの滞留時間が約 30 秒と貫流ボイラに比べて長い、ドラム型ボイラでは、給水に

よるドラムレベル制御が独立して行われている。

従って、ドラム型ボイラでは、滞留時間による蒸気温度制御への影響は SH 部のみで評価すればよい。

3.5 温度制御指数

表 1 には広野 3 号変圧貫流ボイラの定圧比熱とシステム応答時間およびこれから求められる温度制御指数をも示す。温度制御指数とは、制御対象部位の流体の定圧比熱とシステム応答時間の 2 つの要素を加味した蒸気温度制御の容易さを示す値として次式で定義したものである。

$$\text{温度制御指数} = \text{定圧比熱} / \text{システム応答時間} \\ (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$$

定圧比熱が大きくなれば温度制御指数が高くなり、システム応答時間が短くなれば温度制御指数が高くなり、いずれも制御しやすくなることを示す。

表 1 に示す広野 3 号機における新蒸気温度制御の場合、25%、50%、75%、100% 負荷の温度制御指数は 25% 負荷の $0.10 (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$ から 100% 負荷の $0.23 (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$ の範囲の値となる。

また、従来蒸気温度制御の場合、新蒸気温度制御方式に比べて温度制御対象部位の定圧比熱が小さく、システム応答時間も長いために、温度制御指数は 25% 負荷時の $0.012 (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$ から 100% 負荷時の $0.032 (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$ と一桁小さい値となる。

4. 得られた成果

4.1 温度制御指数の比較

図 15 は横軸にシステム応答時間、縦軸に定圧比熱を示したグラフである。

この図で、矢印の方向が温度制御指数の高い方向である。図には、変圧貫流ボイラの新蒸気温度制御方式と従来制御方式の 50% 負荷と 100% 負荷における値を示すが、新制御方式がより温度制御指数が高くなることがわかる。

図 15 には、ドラム型ボイラの蒸気ドラム出口部と、定圧貫流ボイラの新制御方式の制御対象部位である水冷壁出口部の値も示す。ドラム型ボイラは定圧比熱が最も大きい値を示し、また、システム応答時間も短いことから、温度制御指数が高く制御しやすいことがわかる。

4.2 新蒸気温度制御方式の実機への適用結果

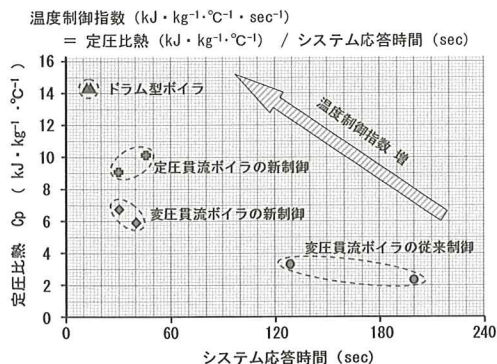


図 15 システム応答時間と定圧比熱の比較

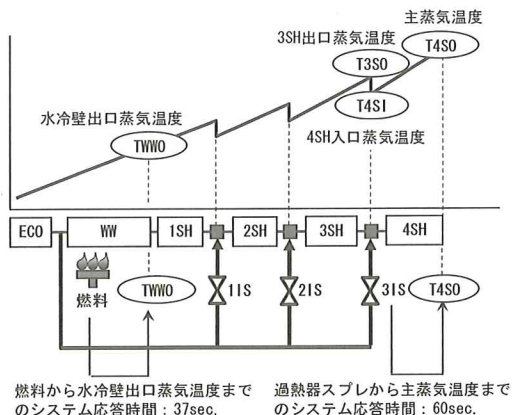


図 16 新蒸気温度制御方式とシステム応答時間

4.2.1 新蒸気温度制御方式の効果

図 16 は新蒸気温度制御方式とそのシステム応答時間を示したものである。新蒸気温度制御方式は、燃料で水冷壁出口蒸気温度を制御し、過熱器スプレで主蒸気温度を制御するものである。広野 3 号機では、燃料から水冷壁出口蒸気温度が変化するまでのシステム応答時間は 37 秒、また、過熱器スプレから主蒸気温度が変化するまでのシステム応答時間は 60 秒である。図 1 に示す従来の蒸気温度制御方式における燃料から主蒸気温度が変化す

るまでのシステム応答時間 190 秒と比べると燃料から制御対象までのシステム応答時間が大幅に短縮されている。

4.2.2 新蒸気温度制御方式による制御性の改善

図 17 に実際にこの新蒸気温度制御方式を採用した広野 3 号機における新蒸気温度制御の結果を示す。

従来の蒸気温度制御方式による結果を示す図 2 と比較すると具体的には以下のような改善が得られた。

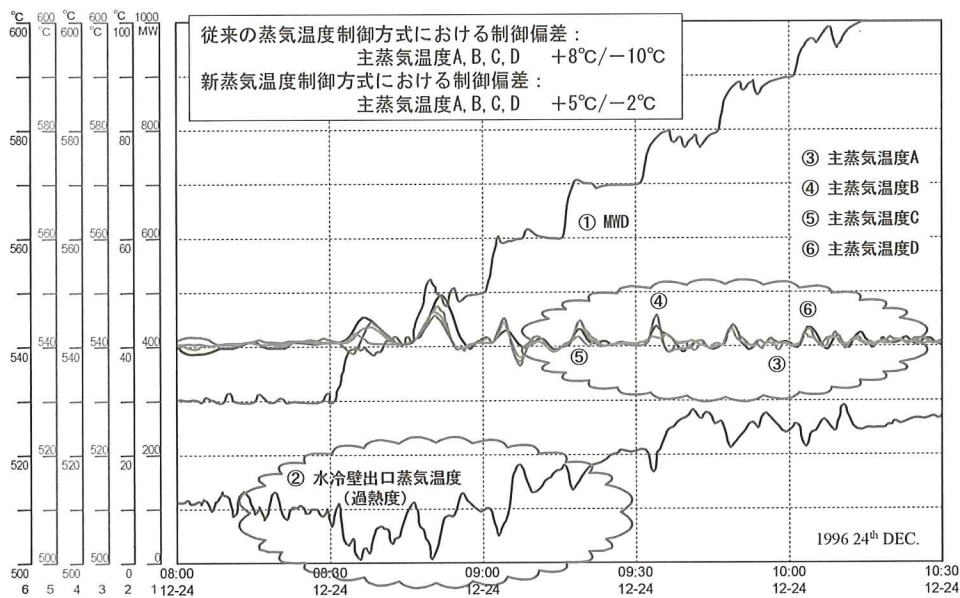


図 17 広野 3 号機における新蒸気温度制御の結果

- ・主蒸気温度が整定するまでの制御は、従来の 15 分以上から 10 分以下に改善。
- ・主蒸気温度 A, B, C, D の制御偏差は、従来の+8°C / -10°C から +5°C / -2°C に改善。

これは燃料の制御対象を、定圧比熱が大きく、かつ、システム応答時間が短い水冷壁出口蒸気温度として、過熱器スプレによって主蒸気温度を制御するように変更したことの効果といえる。

5. 結 論

貫流ボイラ向けに考案した新蒸気温度制御方式によって、以下に示す成果が得られた。

①温度制御指数は制御の容易さを表す指数となる。

定圧比熱とシステム応答時間の 2 つの要素を加味した温度制御指数が、蒸気温度制御の容易さを示す重要な指数となることがわかった。

②新蒸気温度制御方式は貫流ボイラの制御として有効である。

定圧比熱に着目した温度制御方式が、ボイラ中間部の蒸気温度偏差を大幅に低減し、主蒸気温度偏差も低減することが確認できた。

③新蒸気温度制御方式の適用で負荷追従性が向上する。

蒸気温度制御性の向上により、部分負荷運用特性が改善され、負荷変化率の向上が可能となった。

④新蒸気温度制御方式の適用でロジックが単純化された。

本質的で単純なロジックであるために技術伝承も容易である。

謝 辞

新蒸気温度制御方式の開発に当っては三菱重工業(株)松岡 俊規氏に多大な協力を頂いたことに深く感謝致します。また、温度制御指数を取り纏める際に多くの助言を頂いた元三菱重工業(株)岸川 忠弘氏、荒岡 衛氏に心よりお礼申し上げます。さらに、システム応答時間計測では三菱重工業(株)西垣 義道氏にご協力頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 黒石 卓司：制御の単純化，火力原子力発電，第 58 巻，第 6 号，pp. 9-14. (2007-6)

2) 三菱重工業資料

3) 日本機械学会：1999 日本機械学会蒸気表，(1999-11)